


Offenlegungsschrift
DE 195 24 036 A 1

(51) Int. Cl. 6:

G 01 B 9/021

G 01 B 11/30

G 01 J 3/427

G 01 M 11/08

G 02 B 27/48

(30) Innere Priorität: (32) (33) (31)

24.01.95 DE 195019830

(71) Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

(21) Aktenzeichen: 195 24 036.7
 (22) Anmeldetag: 1. 7. 95
 (43) Offenlegungstag: 25. 7. 96

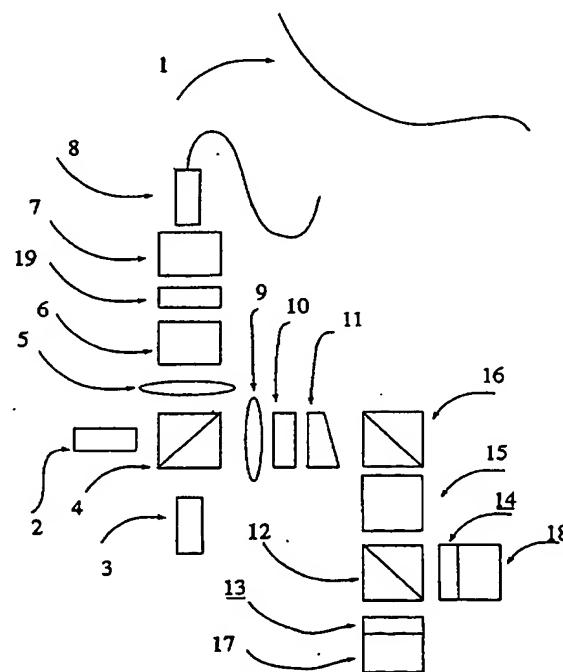
DE 195 24 036 A 1

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

(54) Verfahren und Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung der Form und/oder Formveränderung von Prüflingen

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung der Form und/oder Formveränderung von Prüflingen.

Hierbei wird der im Meßarm eines Interferometers angeordnete Prüfling simultan mit Licht zweier Laserstrahlenquellen beleuchtet, und es werden die mit Licht der ersten Laserstrahlenquelle (2; 21) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzlichtbündel (M1, R1) durch den Einsatz von polarisationsoptischen Bauelementen und/oder Frequenzfiltern räumlich von den mit Licht der zweiten Laserstrahlenquelle (3; 22) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzlichtbündeln (M2, R2) getrennt und die mit dem Licht der ersten Laserstrahlenquelle (2; 21) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten (M1, R1) mit einer ersten Matrix-Kamera (13; 32) und die mit dem einer anderen Wellenlänge aufweisenden Licht der zweiten Laserstrahlenquelle (3, 22) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten (M2, R2) mit einer zweiten Matrix-Kamera (14; 33) beobachtet und die Meßdaten beider beobachteten Intensitätsverteilungen zeittakt-synchron erfaßt und mit Hilfe eines Rechners weiterverarbeitet.



DE 195 24 036 A 1

1
Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur interferometrischen Erfassung der Form und/oder Formveränderung von Prüflingen mit rauher oder polierter Oberfläche, bei dem Licht einer ersten Laserstrahlenquelle und eine andere Wellenlänge aufweisendes Licht einer zweiten Laserstrahlenquelle in einen Meß- und einen Referenzarm eines Interferometers eingespeist und der im Meßarm angeordnete Prüfling simultan mit Licht beider Laserstrahlenquellen beleuchtet wird und bei dem die miteinander interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten mit einer Matrix-Kamera beobachtet werden. Die Erfindung bezieht sich ferner auf eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Es ist allgemein bekannt, zur Verformungs-, Schwingungs- und Qualitätsprüfung die Speckle-Interferometrie zu nutzen (R. Jones, C. Wykes: *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, 1989).

Zur Form erfassung eines Prüflings mit rauher Oberfläche werden dabei zwei verschiedene Wege beschritten:

Bei einem ersten Verfahren wird der Prüfling sequentiell mit Laserlicht verschiedener Wellenlängen (typisch sind zwei Wellenlängen) beleuchtet (Y. Zou, X. Peng, H. Tiziani: *Two-wavelength DSPI surface contouring through the temperature modulation of a Laser diode*, Optik, 1993, No. 4, p. 155—158). Die mit einer einzelnen Matrix-Kamera aufgenommenen Speckle-Muster werden mit Hilfe einer Bildverarbeitungskarte abgespeichert und sodann im Bildspeicher voneinander subtrahiert. Erst nach dieser Datenmanipulation können helle und dunkle Streifen (Interferenzstreifen) im Bild beobachtet werden, die zunächst auch nur qualitativ interpretierbar sind. Mittels geeigneter Methoden, z. B. Anwendung der Phasenschiebetechnik (D. Robinson, G.T. Reid: *Interferogram Analysis*, IOP Publishing, chapter 4: *Temporal phase measurements methods*, p. 94—140), gelingt es schließlich, die gesammelten Meßdaten quantitativ auszuwerten und die Form des Prüflings zu digitalisieren.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens besteht jedoch darin, daß das Objekt bzw. der Prüfling, der untersucht wird, fixiert gelagert sein muß. Ist dies nicht der Fall, so tritt bereits bei kleinen makroskopischen Verschiebungen der Oberfläche während der zwei Aufnahmen eine Dekorrelation der Specklemuster auf. In diesem Fall können grundsätzlich die gewünschten Informationen nicht mehr rekonstruiert werden.

Bei einem zweiten Verfahren wird der Prüfling nicht sequentiell sondern simultan mit Laserlicht verschiedener Wellenlängen beleuchtet. Auch hierbei wird zur Beobachtung der Speckle-Interferogramme eine einzelne Matrix-Kamera eingesetzt. Die bei Anwendung dieses Verfahrens anfallenden Meßdaten sind zwar nicht mit der oben erwähnten Dekorrelationsproblematik konfrontiert, können aber — aufgrund der Addition der Speckle-Interferogramme — nur in Spezialfällen eindeutig ausgewertet werden. Aus diesem Grunde wird dieses Verfahren zur Form erfassung gegenwärtig nur selten angewendet (R. Jones, C. Wykes: *Holographic and speckle interferometry*, Cambridge University Press, 1989).

Es ist ferner bekannt, die Formprüfung von spiegelnden Oberflächen, insbesondere von asphärischen Oberflächen optischer Elemente, interferometrisch mit Hilfe von synthetischen Hologrammen durchzuführen (T.

2
Pfeifer, J. Evertz, R. Tutsch: *Testing aspherics without rotational symmetry using a Fizeau interferometer with computer generated holograms*, SPIE Vol. 1781, Specification and measurement of optical systems, 1992, p. 216—224).

Eine wesentliche Problematik der interferometrischen Formprüfung ergibt sich zum einen aus dem Umstand, daß sehr hohe lokale Interferenzstreifendichten aufgrund einer Unterabtastung des Meßsignals durch die zur Beobachtung eingesetzten Matrix-Kameras häufig nicht mehr ausgewertet werden können, zum anderen daraus, daß Vibrationen und andere hochfrequente Störungen eine drastische Verschlechterung des Meßsignals bewirken. Lediglich unter ganz bestimmten Voraussetzungen, wie dem Vorliegen einer stetigen Oberfläche, und unter Zuhilfenahme einer speziellen durch die Maskierung eines Kamerachips gekennzeichneten Technik, ist es möglich, auch bei Unterabtastung eines Interferogrammes die zu messende Oberfläche rekonstruieren zu können (D. Malacara: *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc., 1992, p. 555—559). Es ist bisher nicht gelungen, von optischen Oberflächen allgemeiner Gestalt (d. h. insbesondere Oberflächen, die die vorgenannten speziellen Voraussetzungen nicht erfüllen) Interferogramme mit hohen lokalen Interferenzstreifendichten in Anwesenheit hochfrequenter Störquellen, z. B. in Maschinenumgebung, erfolgreich auszuwerten.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, für interferometrische Formprüf- und/oder Verformungsuntersuchungen an Objekten mit rauher oder polierter Oberfläche ein Verfahren und eine Vorrichtung anzugeben, die sich gegenüber bekannten derartigen Verfahren und Vorrichtungen durch einen erweiterten Meßbereich sowie Eindeutigkeitsbereich auszeichnen. Insbesondere soll eine schnelle und eindeutige Erfassung bewegter oder stark formändernder Objekte möglich sein.

Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren, wie es im Anspruch 1 definiert ist, erfundungsgemäß gelöst.

Eine vorzugsweise Weiterbildung des erfundungsgemäßen Verfahrens ist Gegenstand des Anspruchs 2.

Die vorgenannte Aufgabe wird ferner mit einer Vorrichtung, wie sie im Anspruch 3 definiert ist, erfundungsgemäß gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungsformen dieser Vorrichtung sind Gegenstand der Unteransprüche 4 bis 7.

Die von zwei Laserstrahlenquellen erzeugte, sich in der Wellenlänge unterscheidende, vorzugsweise im sichtbaren oder nahen Infrarot-Bereich liegende und in ihrer Polarisationsrichtung senkrecht zueinander orientierte Strahlung wird in einem — entsprechend der Applikation vorgegebenen — interferometrischen Aufbau geführt, wobei das zu prüfende Objekt simultan beleuchtet wird. Wesentlich ist, daß der interferometrische Aufbau, z. B. von der Art eines Twyman-Green-, Mach-Zehnder- oder Shearing-Interferometers, durch optische Elemente, wie polarisierende Strahlteilerwürfel bzw. -platten und/oder Frequenzfilter, zur räumlichen Separierung der wellenlängenkodierten Nutzinformation ergänzt ist und die beiden räumlich so getrennten für die Meßdatenerfassung wesentlichen Nutzintensitätsverteilungen (Interferogramme) mit zwei Matrix-Kameras zeittakt-synchron beobachtet werden, so daß bei pixelgenauer Überlagerung der Kameraraster durch Justierung und/oder Datenkorrelation vor oder nach quantitativer Auswertung mittels Verknüpfung zweier oder mehrerer Bilder in Video-Echtzeit und weiterer rechentechnischer Aufbereitung eine Nutzinformation

generiert, z. B. dargestellt werden kann.

Vorteilhaft ist es, wenn zuerst eine der beiden Kameras bzw. der Kamera-Chip dieser Kamera auf einer in den drei Raumrichtungen X, Y und Z bewegbaren Verschiebeeinheit montiert ist, so daß die Kameras bzw. die Kamera-Chips zueinander hochgenau positioniert werden können. Sollten Fehler bei der gegenseitigen Justierung der Chips dennoch nicht zu vermeiden sein, so können diese durch Messung erfaßt und software-seitig kompensiert werden. Hierzu ist ein Korrelationsalgorithmus zu verwenden, welcher den Versatz und/oder die Verdrehung der Kamera-Chips in Bruchteilen einer Pixelgröße als Ergebnis liefert, welches sodann genutzt wird, um die abgespeicherten Datensätze aneinander anzupassen.

Eine Maskierung der Kamera-Chips bewirkt aufgrund der kleineren lichtsensitiven Fläche, daß räumlich hochfrequente Intensitätsschwankungen feiner abgetastet werden können. Die Verbesserung des Signalabtastverhaltens geht allerdings mit einer verminderten Lichtempfindlichkeit einher.

Die Erfindung soll nachstehend anhand zweier Ausführungsbeispiele und einer zugehörigen Zeichnung näher erläutert werden. In der Zeichnung zeigen jeweils schematisch:

Fig. 1a ein erstes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Form erfassung mittels simultaner Zweiwellenlängen-Speckle-Interferometrie,

Fig. 1b ein zweites Ausführungsbeispiel mit einem Twyman-Green-Interferometer,

Fig. 1c ein Beispiel für einen maskierten Kamera-Chip,

Fig. 2 die erfindungsgemäße Vorrichtung komplettiert mit Steuerungs- und Auswertungsbaugruppen und

Fig. 3 ein die software-seitige quantitative Auswertung der abgespeicherten Specklemuster verdeutlichendes Flußdiagramm.

In Fig. 1a bezeichnet 1 einen Prüfling, dessen Oberfläche mit Licht zweier Laserstrahlenquellen 2, 3 beleuchtet wird, wobei das Licht der Laserstrahlenquelle 2 eine vom Licht der Laserstrahlenquelle 3 verschiedene Wellenlänge aufweist und das Licht beider Laserstrahlenquellen 2, 3 senkrecht zueinander polarisiert ist. Die divergent die Laserstrahlenquelle 2 verlassende Lichtstrahlung wird dabei zunächst einem nichtpolarisierenden Strahlteilerwürfel 4 zugeführt, mit dessen Hilfe ein Teil der Lichtstrahlung in einen Meßarm und der andere Teil der Strahlung in einen Referenzarm eingekoppelt wird. Derselbe Strahlteilerwürfel 4 wird auch mit der die Lichtstrahlenquelle 3 divergent verlassenden Lichtstrahlung beaufschlagt und zwar so, daß auch hier ein Teil der Lichtstrahlung in den Meßarm und der andere Teil in den Referenzarm gelangen. Die in den Meßarm eingekoppelte Lichtstrahlung durchläuft zunächst zum Zwecke der Strahlanpassung, z. B. einer Strahlaufweitung, eine Linse oder ein Linsensystem 5 sowie gegebenenfalls weitere Bauelemente 6, 7, die der Bestimmung bzw. Stabilisierung der Wellenlängen der Laserstrahlenquellen 2 und 3 dienen, bevor sie dann in einer flexiblen Optik in Form einer Glasfaser 8 weitergeführt und auf die Prüflingsoberfläche gelenkt wird. Im Referenzarm befindet sich in Strahlausbreitungsrichtung hinter einer gleichfalls der Strahlanpassung dienenden Linse bzw. einem Linsensystem 9 ein Neutralfilter 10, mit dem die Intensität der Referenzwellenfront derjenigen der Meßwellenfront angepaßt werden kann. Die im Referenzarm propagierenden Wellenfronten werden durch Spiegel und/oder Phasenobjekte wie z. B. Glasplatten,

sphärische oder asphärische Linsen definiert. So entstehen beispielsweise ebensochenhaft aufgeweitete Wellenfronten durch eine opische Anordnung, die durch die Fokussierung der Strahlung auf einen Raumfilter in Verbindung mit einer Linse, welche im Abstand ihrer Brennweite vom Raumfilter plaziert ist, gekennzeichnet ist. Im Referenzarm befindet sich außerdem eine dem Neutralfilter 10 in Lichtausbreitungsrichtung nachgeordnete Phasenschiebeeinheit 11, die z. B. als Flüssigkristall-Phasenschieber für eine zeitliche Phasenschiebung oder als Glasplatte mit einer zur optischen Achse des Referenzarmes verkippten Fläche für eine räumliche Phasenschiebung ausgebildet ist. Derartige Bauelemente ermöglichen letztlich die quantitative Auswertung der Speckle-Interferogramme. Der Phasenschiebeeinheit 11 folgt in Lichtausbreitungsrichtung ein nichtpolarisierender Strahlteilerwürfel 16, der das einfallende Referenzlicht und das von der Oberfläche des Prüflings 1 reflektierte und an einer zweiten Seite des Strahlteilerwürfels 16 empfangene Meßlicht in eine gemeinsame Richtung auf ein nachgeordnetes Kameraobjektiv 15 zusammenführt. Im gewählten Beispiel passiert das Meßlicht den Strahlteilerwürfel 16 in Transmission während das Referenzlicht mittels Strahlteilerwürfels 16 in Richtung Kameraobjektiv 15 reflektiert wird. Dem Kameraobjektiv 15 folgt in Lichtausbreitungsrichtung ein polarisierender Strahlteilerwürfel 12, der die einfallenden Referenzwellenfronten entsprechend den Polarisationsrichtungen der jeweiligen Komponenten reflektiert bzw. transmittiert. Hierdurch wird eine räumliche Trennung der Referenzwellenfronten erreicht und zwar in Abhängigkeit von ihrer Wellenlänge, d. h. ohne Einschränkung der Allgemeinheit kann angenommen werden, daß von einer ersten, in Transmissionseinstellung angeordneten Matrix-Kamera 13 nur Beiträge der Referenzwellenfront R1 der Laserstrahlenquelle 2 und von einer zweiten, in Reflexionsrichtung angeordneten Matrix-Kamera 14 nur Beiträge der Referenzwellenfront R2 der Laserstrahlenquelle 3 zu beobachten sind. Der zwischen Kameraobjektiv 15 und dem Kamera-Chip 13 einerseits bzw. dem Kamera-Chip 14 andererseits angeordnete polarisierende Strahlteilerwürfel 12 bewirkt außerdem, daß die der Laserstrahlungsquelle 2 zugeordnete Meßwellenfront M1 und die der Laserstrahlungsquelle 3 zugeordnete Meßwellenfront M2 separiert werden, und zwar indem die Meßwellenfront M1 den Strahlteilerwürfel 12 in Transmission in Richtung Kamera-Chip 13 passiert, hingegen die Meßwellenfront M2 vom Strahlteilerwürfel 12 durch Reflexion in Richtung Kamera-Chip 14 gelenkt wird. Vor den beiden Kamera-Chips 13 und 14 interferieren die Meß- und die Referenzwellenfronten, also die Meßwellenfront M1 mit der Referenzwellenfront R1 beim Kamera-Chip 13 und die Meßwellenfront M2 mit der Referenzwellenfront R2 beim Kamera-Chip 14. Selbstverständlich ist es auch möglich, anstelle eines polarisierenden Strahlteilerwürfels 12 eine polarisierende Strahlteilerplatte einzusetzen. Wichtig ist, daß die beiden Matrix-Kameras 13 und 14 bzw. deren Chipraster pixelgenau gegeneinander ausgerichtet sind. Dies wird mit Hilfe von in den drei Raumrichtungen X, Y und Z eines rechtshändigen Koordinatensystems bewegbaren XYZ-Verschiebeeinheiten 17 und 18 sichergestellt. Des weiteren muß eine Abbildung eines Gegenstandes (Prüflings) durch das gemeinsam genutzte Kameraobjektiv 15 auf beiden Kamera-Chips 13, 14 die gleiche Größe besitzen. Hierzu ist ein identischer Abstand derselben von der Hauptebene des Kameraobjektivs 15 einzustellen. Auch dies ge-

schieht mittels der XYZ-Verschiebeeinheiten 17 und 18, auf denen die Kameras bzw. Kamera-Chips 13, 14 montiert sind.

Fig. 1b zeigt eine als Twyman-Green-Interferometer aufgebaute Vorrichtung zur Prüfung einer asphärischen Oberfläche eines Prüflings 20. Das von einer ersten Laserstrahlenquelle 21 ausgestrahlte Licht wird hierbei in Reflexion und das von einer zweiten Laserstrahlenquelle 22 ausgesandte, sich in seiner Wellenlänge von der Laserstrahlung der Quelle 21 unterscheidende Licht in Transmission durch einen polarisierenden Strahlteilerwürfel 23 in eine z. B. aus einer Linse und einem Pinhole bestehende Raumfiltereinheit 24 eingekoppelt. Die nach Passieren der Raumfiltereinheit 24 sich ausbreitenden und durch ihre Wellenlänge charakterisierten beiden Kugelwellen werden sodann mit Hilfe eines Strahlteilerwürfels 25 in einen Referenz- und in einen Meßarm aufgespalten. Der in den Referenzarm gelenkte Strahlungsanteil durchläuft zunächst zur Strahlanpassung ein Linsensystem 26, 27 und wird dann an einem Referenzspiegel 28 in sich reflektiert. Der in Transmission den Strahlteilerwürfel 25 durchlaufende, in den Meßarm geführte Strahlungsanteil passiert zunächst gleichfalls ein Linsensystem 29 zur Strahlanpassung, bevor dieser dann an der Oberfläche des Prüflings 20 reflektiert wird. Die rücklaufenden Meß- und Referenzwellenfronten werden schließlich mittels Strahlteilerwürfels 25 in den Beobachtungsarm gelenkt, wo es zur Überlagerung kommt. Mit Hilfe einer im Beobachtungsarm angeordneten Linse 30 wird die aus Meß- und Referenzarm herrührende Strahlung kollimiert. Hierzu ist es erforderlich, daß die Brennweiten der Linsen 26 und 29 derart aufeinander abgestimmt sind, daß die Lage ihrer Brennpunkte im Beobachtungsarm identisch ist. Eine weitere Bedingung für die Brennweiten der Linsen besteht darin, daß das durch Kollimationslinse 30 und Linsensystem 26, 27 entstehende Bild des Referenzspiegels 28 größer sein muß als das durch Kollimationslinse 30 und Linse 29 entworfene Bild des Prüflings 20. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, entstehen über die gesamte zu prüfende Oberfläche des Prüflings 20 Interferenzstreifen. Die für beide Laser-Wellenlängen auftretenden Interferogramme werden wie beim vorbeschriebenen Ausführungsbeispiel zur Speckle-Interferometrie durch die Nutzung eines polarisierenden Strahlteilerwürfels 31 räumlich voneinander getrennt. Das heißt, die jeweils mit dem Licht ein und derselben Laserstrahlenquelle 21 bzw. 22 erzeugten und interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten M1, R1 bzw. M2, R2 werden zum einen vom im Beobachtungsarm plazierten polarisierenden Strahlteilerwürfel 31 in Transmission auf einen Kamera-Chip einer Kamera 32 und zum anderen in Reflexion auf einen Kamera-Chip einer Kamera 33 geführt. Im übrigen ist es selbstverständlich auch denkbar, anstelle eines polarisierenden Strahlteilerwürfels 31 eine polarisierende Strahlteilerplatte einzusetzen.

Eine mögliche Maskierung der Kamera-Chips der Kameras 13, 14, 32 und 33 zeigt Fig. 1c. Die zu wählende Maskierung der Kamera-Chips hängt von dem, durch den Hersteller vorgegebenen Chipraster ab und sei anhand des in der Zeichnung dargestellten speziellen Falles eines quadratischen Rasters erläutert. Besitzt der in der Zeichnung mit 34 bezeichnete Chip $N \times M$ Pixel 35 auf einem (beliebigen) Raster mit Abmessungen D_x und D_y , so ist bezogen auf jedes einzelne Pixel 35 eine Maske derart definiert, daß im Flächenschwerpunkt des Pixels 35 ein im Hinblick auf die Applikation zu bestimmendes Gebiet, z. B. ein Quadrat mit der Kantenlänge d

von der Maskierung ausgespart bleibt, wobei die Fläche des Gebietes kleiner als $D_x \cdot D_y$ ist.

Fig. 2 zeigt die erfindungsgemäße Vorrichtung komplettiert mit Steuerungs- und Auswerterebenengruppen in einem Blockdiagramm. 2 und 3 bezeichnen hier die beiden Laserstrahlenquellen, 4 den Strahlteilerwürfel, der mit dem Licht der Laserstrahlenquellen 2 und 3 beaufschlagt wird, 12 den polarisierenden Strahlteilerwürfel, 13 und 14 die beiden Matrix-Kameras sowie 35 die übrigen Bauelemente des anhand von Fig. 1a erläuterten Interferometers einschließlich Prüfling 1 (Ebensogut könnten für diese Baugruppen auch die mit 20 bis 34 bezeichneten Bauelemente bzw. Baugruppen des Twyman-Green-Interferometers gemäß Fig. 1b stehen).

Den Laserstrahlenquellen 2 und 3 jeweils zugeordnet sind Versorgungsgeräte 36 bzw. 37, die z. B. eine Laserstromquelle, eine Baugruppe zur Temperaturregelung und gegebenenfalls einen Regelkreis zur Wellenlängenstabilisierung umfassen. Die beiden Matrix-Kameras 13 und 14 sind entweder jeweils mit einer Bildverarbeitungskarte 38 bzw. 39 oder mit einer einzigen, zwei Eingänge aufweisenden Bildverarbeitungskarte gekoppelt. Die Bildverarbeitungskarten 38, 39 sind mit einer Triggereinheit 40 verbunden, die für eine zeitsynchrone Aufnahme der Bilder sorgt. Ein Computer 41 übernimmt dabei sowohl die Ansteuerung der Zeittriggereinheit 40 als auch die Kommunikation mit den Bildverarbeitungskarten 38, 39 sowie die Auswertung 42 der in einem Speicher der Karten 38, 39 abgelegten Intensitätsbilder und gegebenenfalls die Ansteuerung der Phasenschiebeeinheit 11.

Wesentlich ist, daß die Aufnahme der Bilder durch die beiden Matrix-Kameras 13, 14 bzw. 32, 33 mit Hilfe der Triggereinheit 40 zeitsynchron erfolgt. Dies verhindert im Fall der Speckle-Interferometrie eine informationszerstörende Dekorrelation der Specklemuster aufgrund einer möglicherweise vorliegenden Bewegung des Prüflings 1 und minimiert im Fall der Formprüf-Interferometrie Störeinflüsse. Die ausgewerteten Daten können auf einem oder mehreren Monitoren dargestellt und/oder einer Steuereinheit 43 übergeben werden.

In Fig. 3 ist die software-seitige Auswertung der abgespeicherten Specklemuster verdeutlichendes Flußdiagramm dargestellt. Demnach läuft die Datenverarbeitung der erfaßten Bilddaten für beide Matrix-Kameras 13, 14 zunächst parallel und unabhängig voneinander. Eine durch die Wahl eines Auswertealgorithmus 44a, 44b festgelegte Anzahl von Intensitätsdatensätzen 45a, 45b werden dabei so miteinander verknüpft, daß die in der Grauwertverteilung kodierten Phasenwerte 46a, 46b – für jede Wellenlänge separat – im Intervall von 0 bis 2π berechnet werden. Neben den Phasenwerten 46a, 46b können aus den Intensitätsdateien zudem Daten für die Kontrastmodulation und die Grundintensität bestimmt werden. Wichtig für die weitere Datenverarbeitung ist, daß die (den Prüfling repräsentierenden) Datensätze hochgenau aufeinander abgebildet werden. Hierzu ist ein Meßdatensatz zu spiegeln. Die Spiegelung 47a kann wahlweise bereits bei der Bildaufnahme der als Rohdaten zu bezeichnenden Interferogramme erfolgen. Unterstellt man, daß der Prüfling fest mit einem Koordinatensystem verbunden ist, so muß in diesem Zusammenhang zudem gewährleistet sein, daß entweder durch Justierung oder durch software-seitige Verknüpfung 47b die Projektion der beobachteten Koordinatensysteme auf die Kamera-Chips identisch ist. Erst danach dürfen die Phasendateien verknüpft, d. h. voneinander substrahtiert werden. Nach Subtraktion 48 erfolgt eine Ent-

faltung 49, indem vorhandene 2π -Sprünge beseitigt werden. Die nach Entfaltung 49 folgenden vorläufigen Ergebnisdaten werden sodann in geeigneter Art und Weise skaliert. Der bei der Skalierung 50 verwendete Skalierungsfaktor S errechnet sich aus den eingesetzten Laserwellenlängen λ_1 und λ_2 :

$$S = (1/2\pi) \lambda_{\text{syn}} = (1/2\pi) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (1/(\lambda_1 - \lambda_2)).$$

Mit dem Skalierungsfaktor S werden die Phasendaten 10 multipliziert. Die Größe λ_{syn} wird als synthetische Wellenlänge bezeichnet und legt die Meßwertauflösung bzw. die Meßempfindlichkeit fest. Verzeichnungen oder 15 wellenlängenabhängige Aberrationen u. a., die ihre Ursache in den benutzten optischen Elementen haben, können bei Nutzung von Korrekturalgorithmen 20 51 oder Strahlverfolgungsprogrammen (gegebenenfalls iterativ) kompensiert werden. Eine Verdichtung der Daten z. B. durch die Anpassung von Funktionensystemen (Splines oder Zernike-Polynome) oder eine graphische Aufbereitung und Darstellung auf einem Monitor ermöglichen schließlich die unmittelbare Beurteilung und Interpretation der digitalisierten Daten 52.

25 Patentansprüche

1. Verfahren zur interferometrischen Erfassung der Form und/oder Formveränderung von Prüflingen 30 mit rauer oder polierter Oberfläche, bei dem Licht einer ersten Laserstrahlenquelle und eine andere Wellenlänge aufweisendes Licht einer zweiten Laserstrahlenquelle in einen Meß- und einen Referenzarm eines Interferometers eingespeist und der im 35 Meßarm angeordnete Prüfling simultan mit Licht beider Laserstrahlenquellen beleuchtet wird und bei dem die miteinander interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten mit einer Matrix-Kamera beobachtet werden, dadurch gekennzeichnet, daß 40 die mit dem Licht der ersten Laserstrahlenquelle (2; 21) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzlichtbündel (M1, R1) durch den Einsatz von polarisationsoptischen Bauelementen und/oder Frequenzfiltern räumlich von den mit 45 dem Licht der zweiten Laserstrahlenquelle (3; 22) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzlichtbündeln (M2, R2) getrennt werden und die mit dem Licht der ersten Laserstrahlenquelle 50 (2; 21) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten (M1, R1) mit einer ersten Matrix-Kamera (13; 32) und die mit dem Licht der zweiten Laserstrahlenquelle (3; 22) erzeugten, miteinander interferierenden Meß- und 55 Referenzwellenfronten (M2, R2) mit einer zweiten Matrix-Kamera (14; 33) beobachtet werden und daß die Meßdaten beider beobachteten Intensitätsverteilungen (Interferogramme) zeittakt-synchron erfaßt und mit Hilfe eines Rechners weiterverarbeitet werden, wobei der Verknüpfung der Meßdaten der beiden Interferogramme eine pixelgenaue Zuordnung der beiden Kameraraster durch gegenseitige Justierung derselben vorausgeht und/oder die vorher meßtechnisch erfaßten Justagefehler durch Datenkorrelation kompensiert werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Verarbeitung der Meßdaten folgende Schritte umfaßt:

— Berechnung der in der Grauwertverteilung kodierten Phasewerte (46a, 46b) aus den gemessenen Intensitätsdaten im Intervall von 0 bis 2π und zwar für jede Wellenlänge separat,

— Hochgenaue Abbildung der Datensätze aufeinander durch Spiegelung (47a) eines der beiden Meßdatensätze,

— Subtraktion (48) der Dateien,

— Beseitigung von 2π -Sprüngen durch Entfaltung (49),

— Skalierung (50),

— Beseitigung von wellenlängenabhängigen Aberrationen und Verzeichnungen, z. B. mittels Korrekturalgorithmen, und

— Ausgabe der so korrigierten und gegebenenfalls verdichteten Daten für eine graphische Darstellung auf einem Monitor und/oder zu Steuerungszwecken.

3. Vorrichtung zur interferometrischen Erfassung der Form und/oder Formveränderung von Prüflingen mit rauer oder polierter Oberfläche, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 oder 2, mit zwei Laserstrahlenquellen, die Licht unterschiedlicher Wellenlänge in einen Meß- und einen Referenzarm eines Interferometers einspeisen und den im Meßarm angeordneten Prüfling simultan beleuchten, und mit einer Kamera, mit der die interferierenden Meß- und Referenzwellenfronten erfaßt werden, dadurch gekennzeichnet, daß das von beiden Laserstrahlenquellen (2; 3; 21, 22) erzeugte Licht, mit dem der Prüfling (1; 20) simultan beleuchtet wird, senkrecht zueinander polarisiert ist,

daß das Interferometer zur räumlichen Separierung der mit dem Licht der ersten Laserstrahlenquelle (2; 21) erzeugten und miteinander interferierenden Meß- und Referenzlichtbündel (M1, R1) von den mit dem Licht der zweiten Laserstrahlenquelle (3; 22) erzeugten und miteinander interferierenden Meß- und Referenzlichtbündel (M2, R2) mit einem polarisationsoptischen Bauelement und/oder Frequenzfiltern ergänzt ist, daß eine zweite Kamera vorgesehen ist und die Kameras (13, 14; 32, 33) als Matrix-Kameras ausgebildet sind, die einen Füllfaktor ihrer lichtempfindlichen Pixelflächen von kleiner 50% aufweisen, daß die Kameras (13, 14; 32, 33) mit ihren lichtempfindlichen Flächen zueinander justierbar und so angeordnet sind, daß jede der beiden Kameras (13, 14; 32, 33) eines der Interferogramme erfaßt, daß ferner eine Triggeleinheit (40) vorgesehen ist, mit deren Hilfe eine zeittakt-synchrone Aufnahme der Bilder durch die Kameras (13, 14; 32, 33) erfolgt und daß ferner die Kameras (13, 14; 32, 33) mit einem Rechner gekoppelt sind.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das polarisationsempfindliche Bauelement ein Strahlteilerwürfel (12; 31) ist.

5. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das polarisationsempfindliche Bauelement eine Strahlteilerplatte ist.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest eine der beiden Kameras (13, 14; 32, 33) auf einer XYZ-Verschiebeeinheit (17, 18) montiert ist.

7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die lichtempfindli-

chen Flächen der Kameras (13, 14; 32, 33) maskiert
sind.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

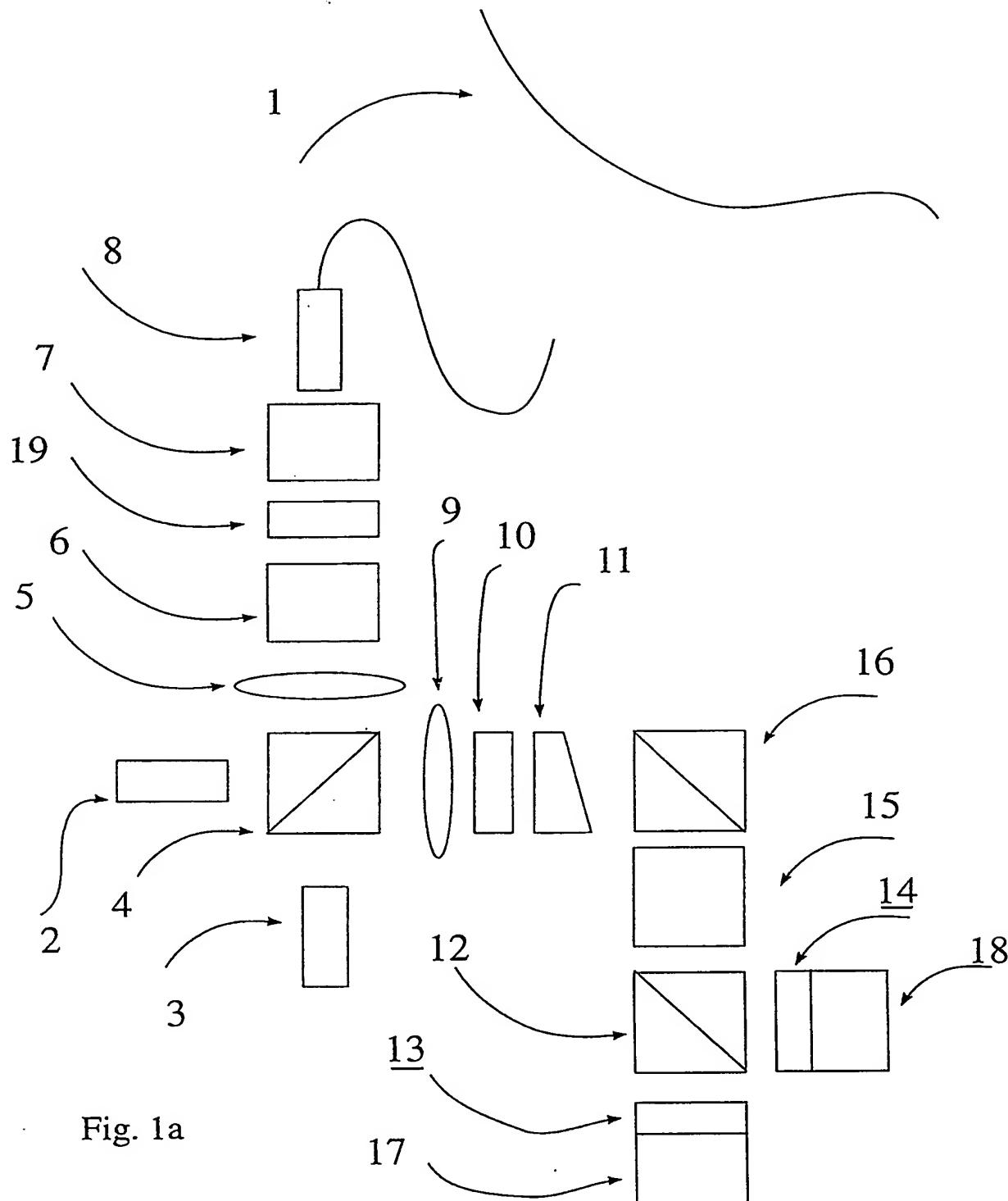


Fig. 1a

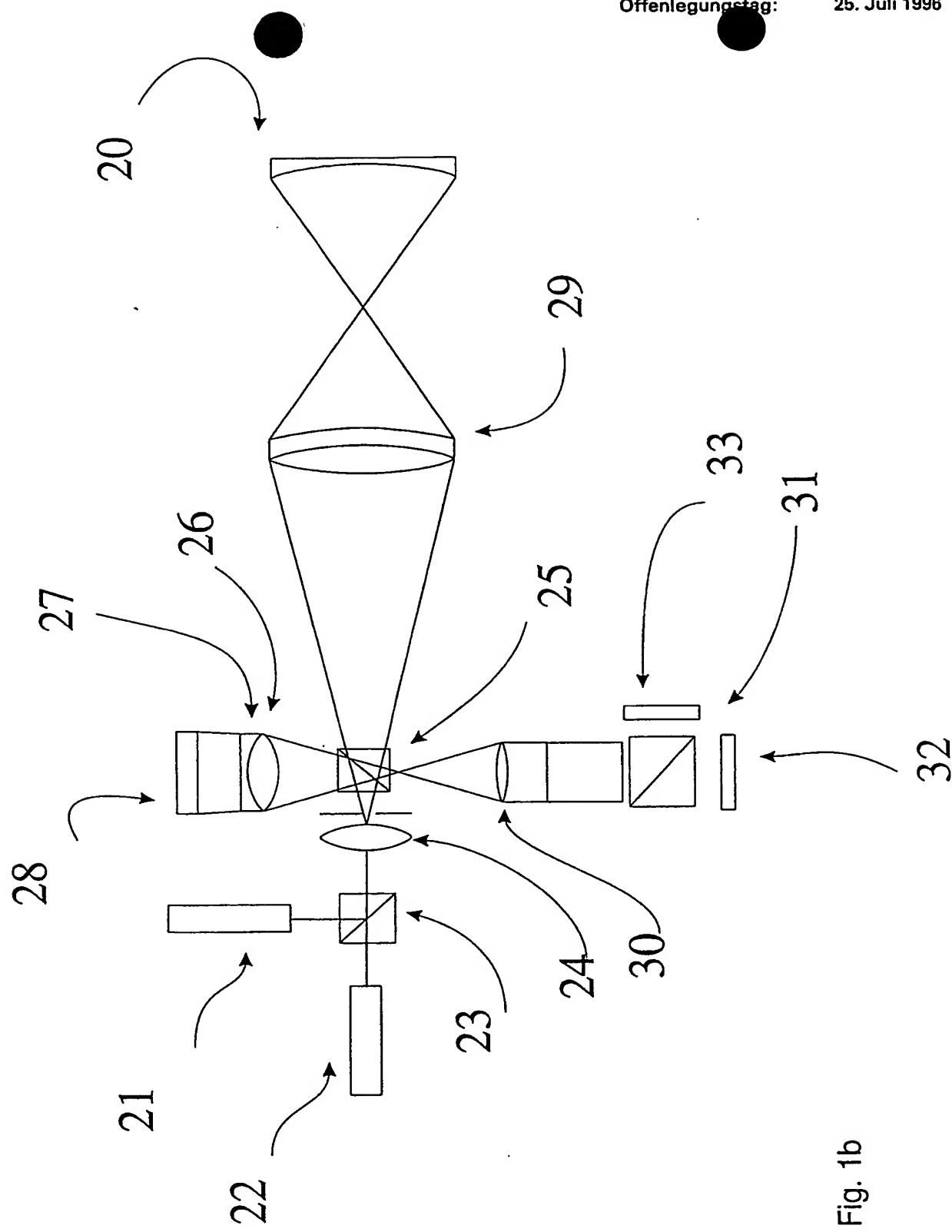


Fig. 1b

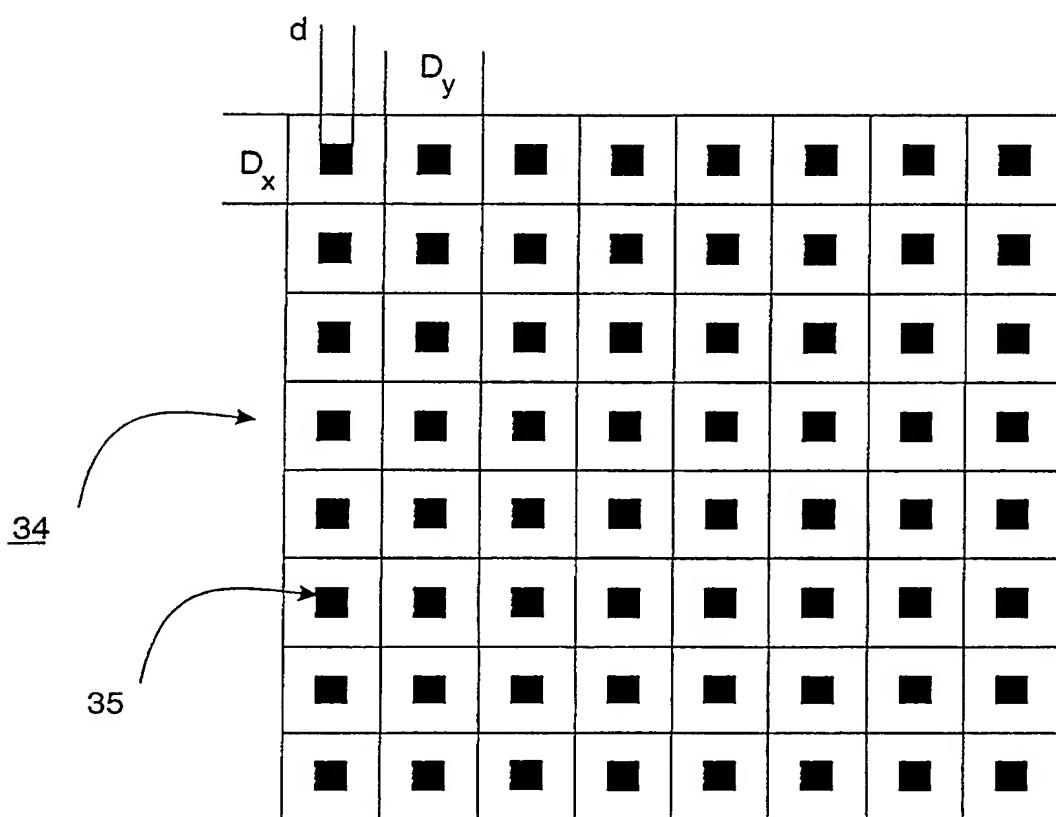


Fig. 1c

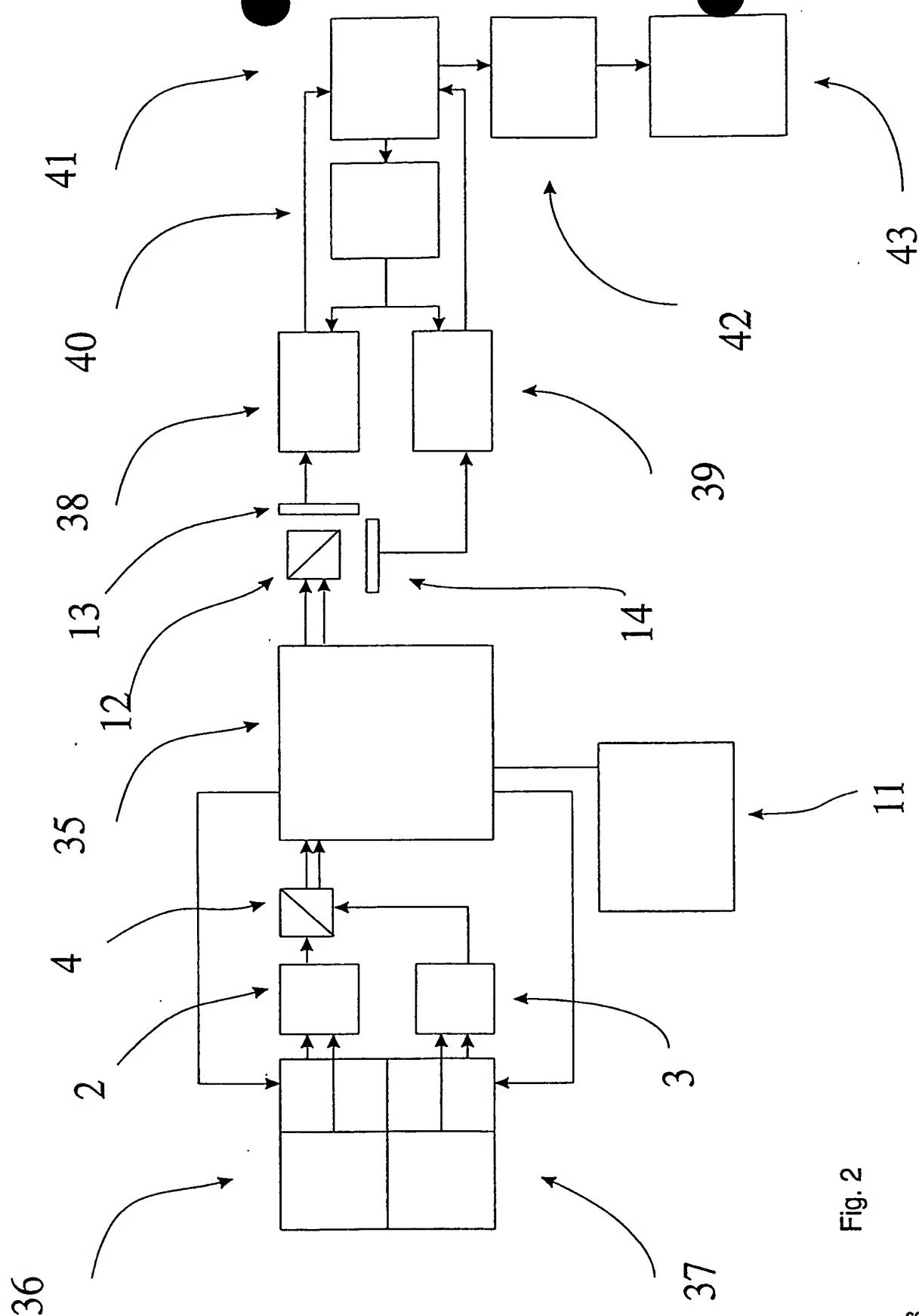


Fig. 2

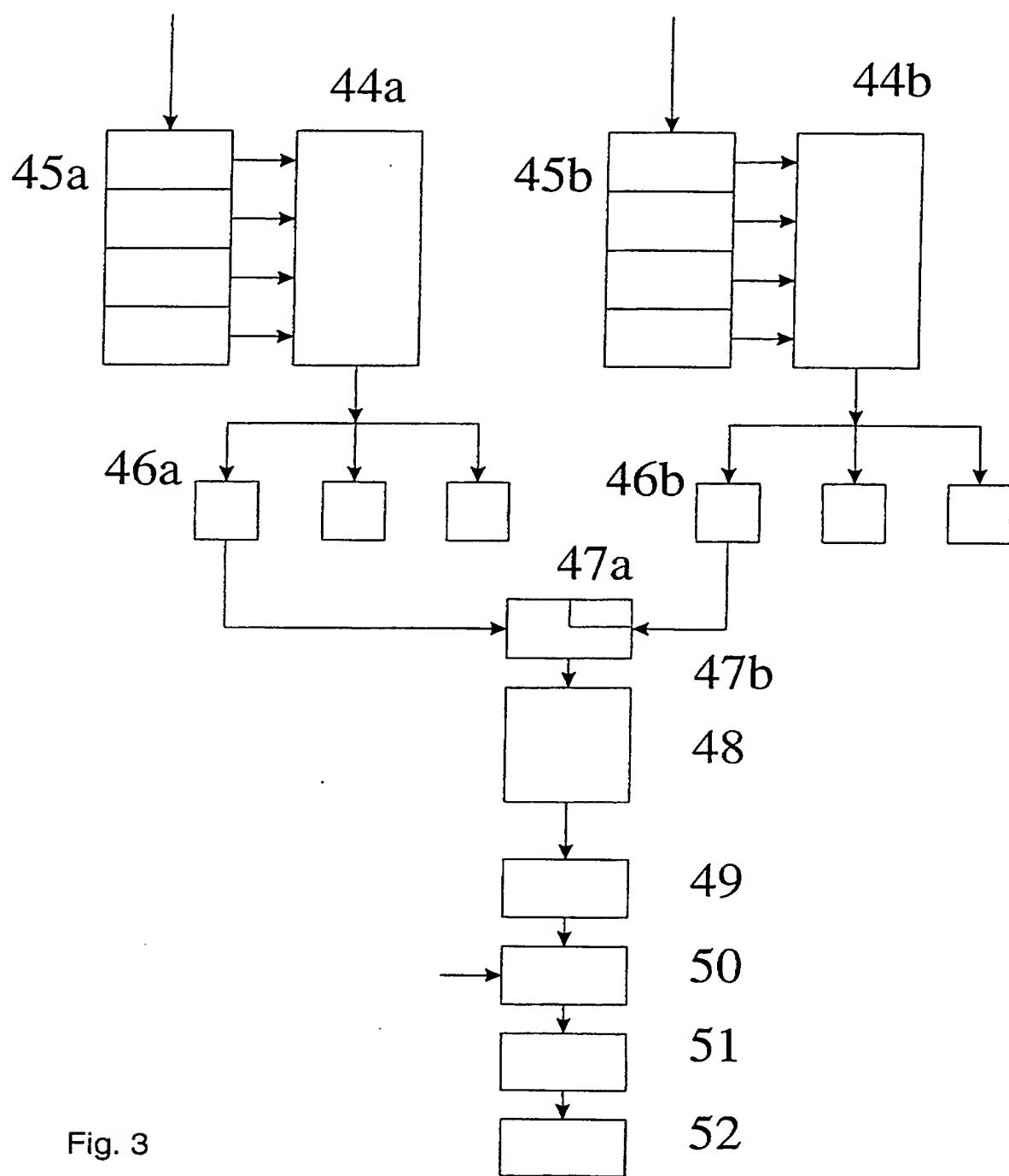


Fig. 3